

Плазмовий фокус

1. Різні модифікації плазмового фокусу (ПФ)

2. Особливості організації електричного розряду у системах плазмового фокусу

2.1. Вимоги до енергетики.

2.2. Особливості газонапуску.

2.3. Характеристики розряду у системах ПФ.

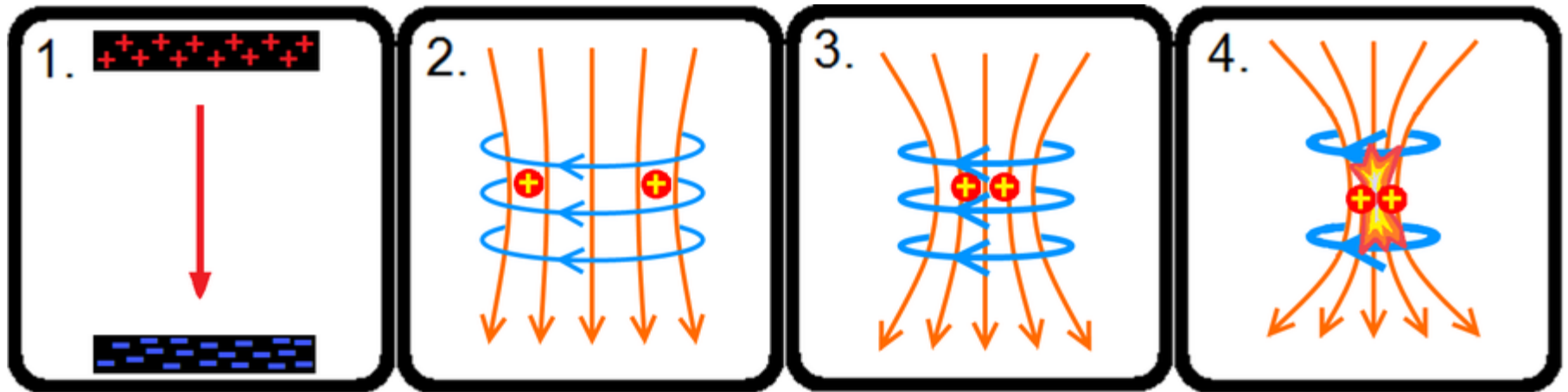
3. Характеристики електромагнітного випромінювання ПФ

4. Закони подібності для інтенсивності нейтронного випромінювання ПФ

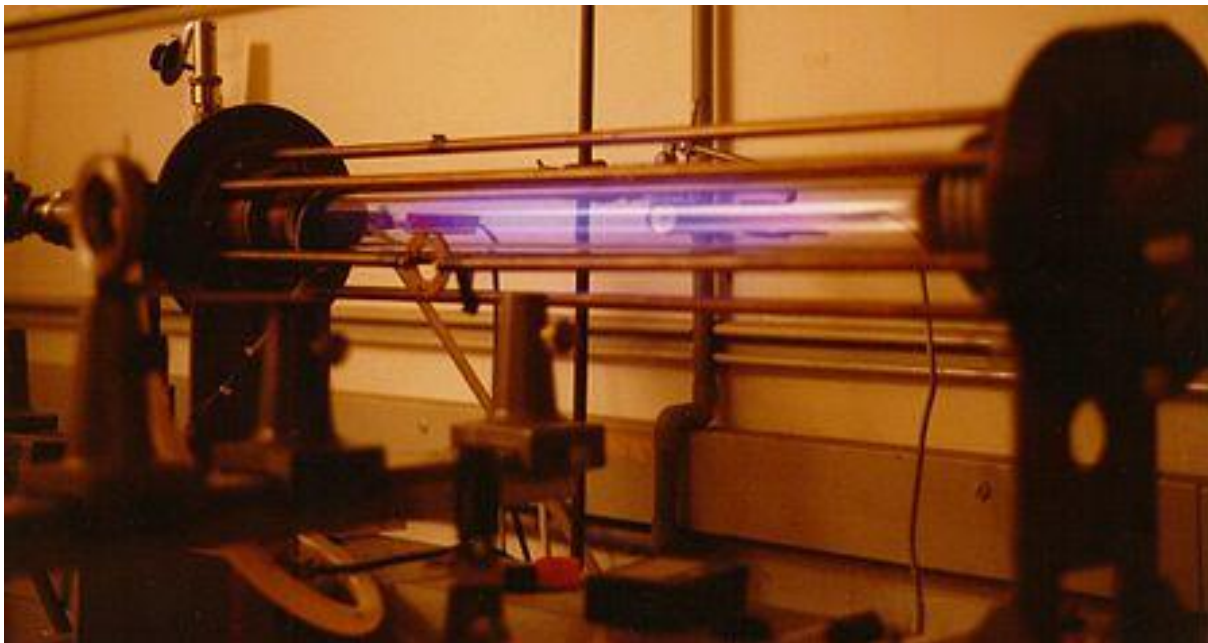
5. Часові та просторові характеристики потоків швидких іонів та електронів, що генеруються в системах ПФ.

6. Деякі технологічні застосування

Z пінч



Voltage Current Magnetic Field Ion

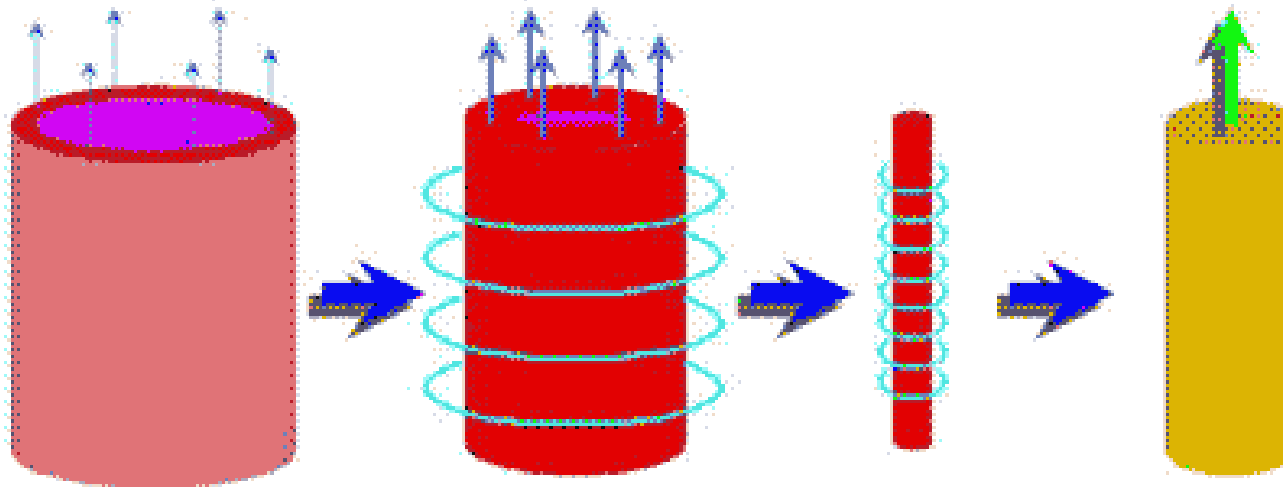


Initial phase

Compression phase

Pinch

Expansion phase



Hot temperature and
High density plasma

Super-cooled plasma by
rapid expansion

Співвідношення Беннетта

$$p_{\text{пл}} - p_{\text{магн}} = B^2/8\pi.$$

$$B^2/8\pi = 2nkT.$$

$$B = 2J/cr \quad J^2 = 4c^2kNT$$

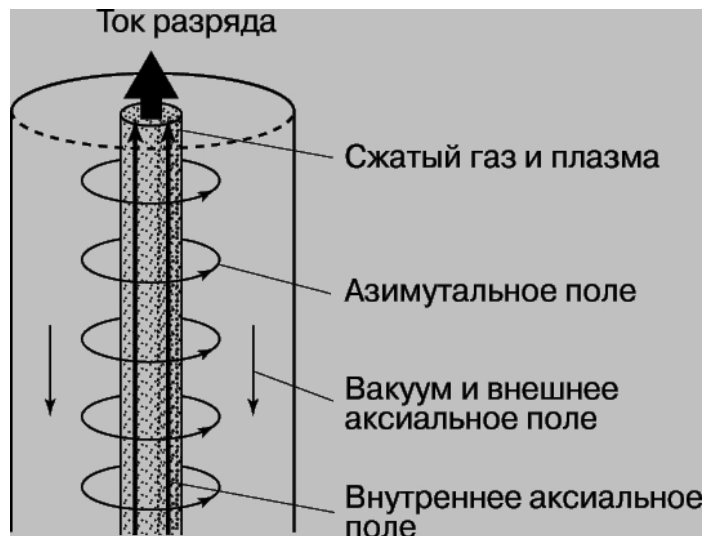
N - число частинок в перетині пінча

$$N = \pi r^2 n$$

$T = 10^8 \text{ K}$, можна досягти при 1-10 МА

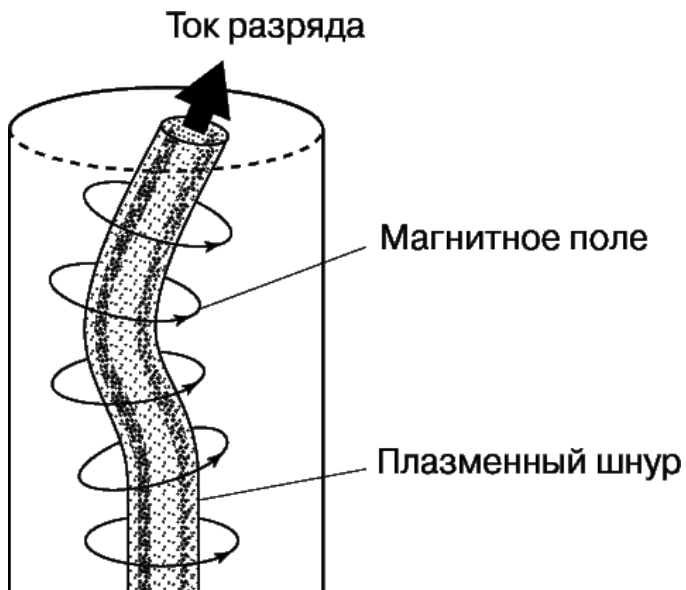
$$\nabla p = \nabla(p_e + p_i) = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

Струм Піза-Брагінського, для дейтерієвого пінча 1.5 МА

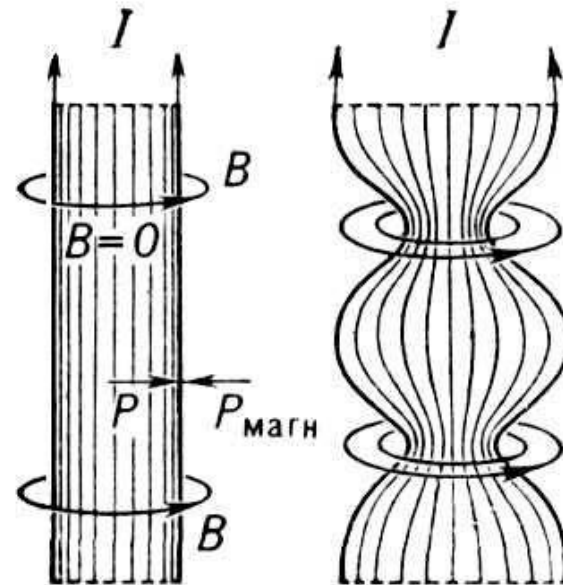


Field reversed pinch,
Gas embedded pinch,
capillary discharge
etc.

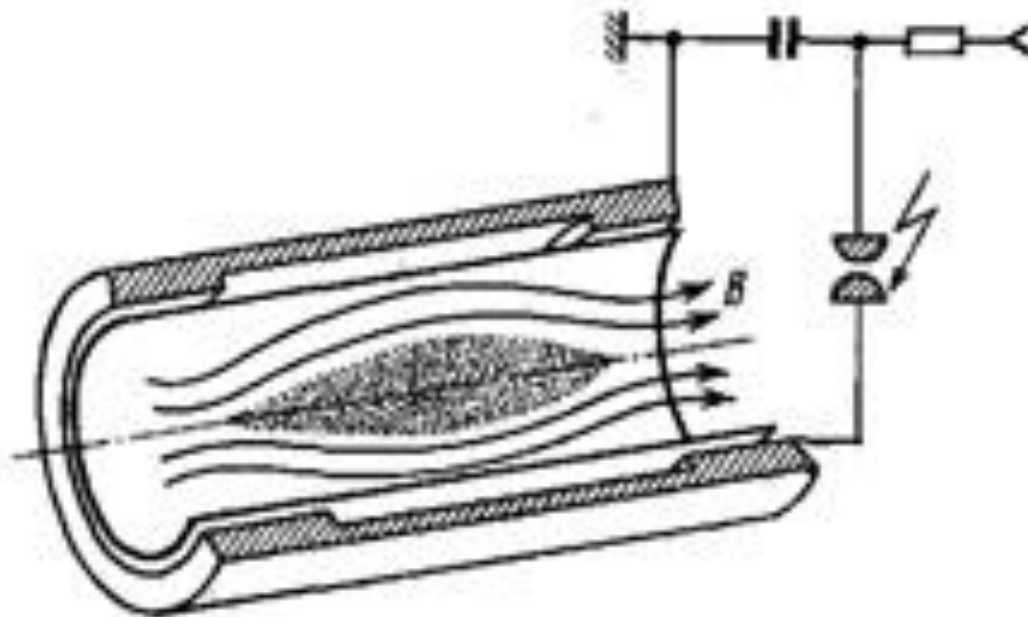
Teta pinch



Неустойчивость изгиба



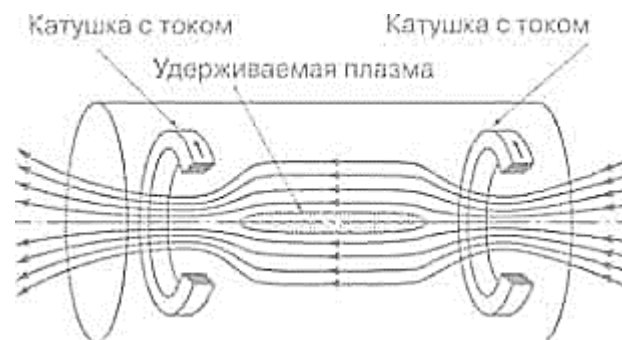
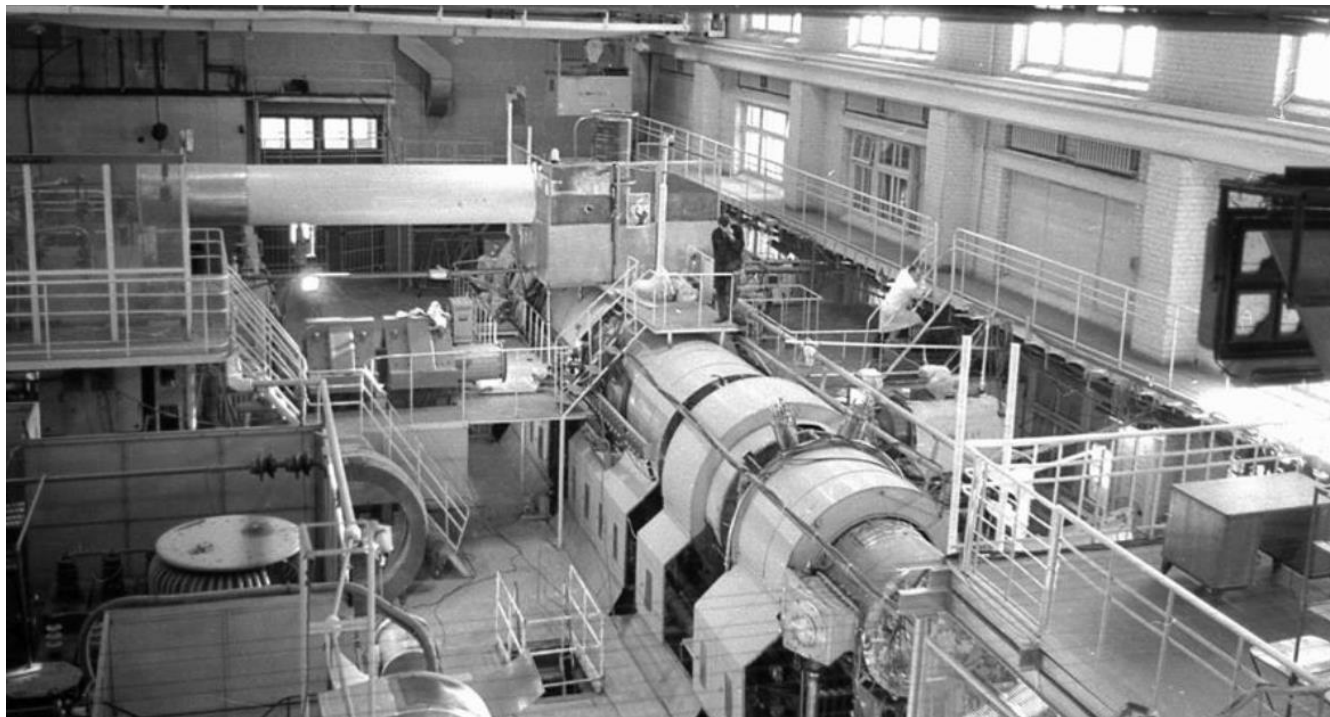
Неустойчивость перетяжки

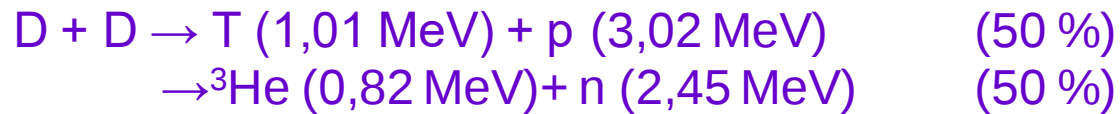


Тета пинч
Сцилла- Лос Аламос



ОГРА





Плазменный Фокус (DPF-dense plasma focus)

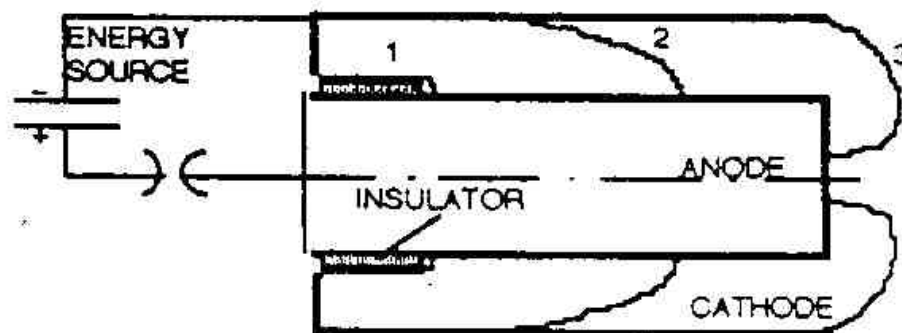
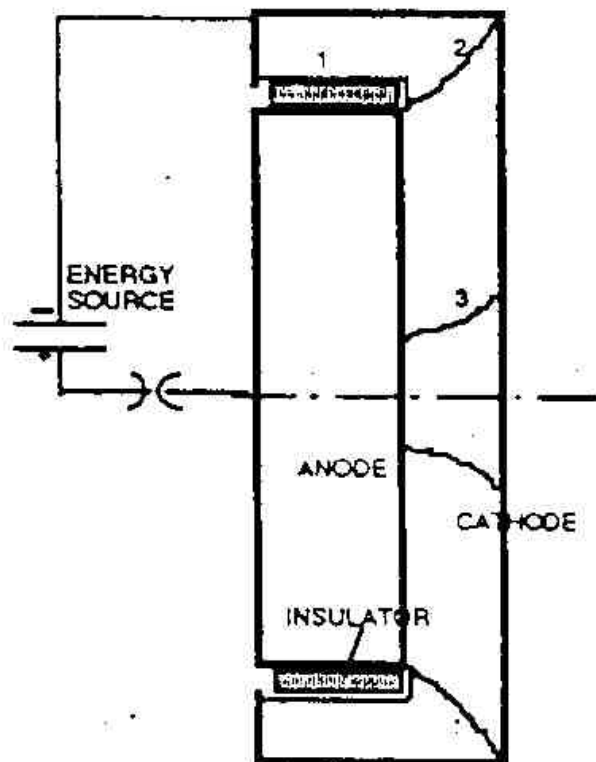


Figure 1.1. left: Filippov design;
above: Mather design.

PARAMETERS

DPF usually operates with **deuterium or deuterium-tritium** mixture as a working gas

- densities in plasma streams
- velocities of plasma streams
- efficiency of plasma streams
- power flux density

$$N = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$v = 5 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$$

$$k = 10\%$$

$$P = 10^4 \text{ MW/m}^2$$

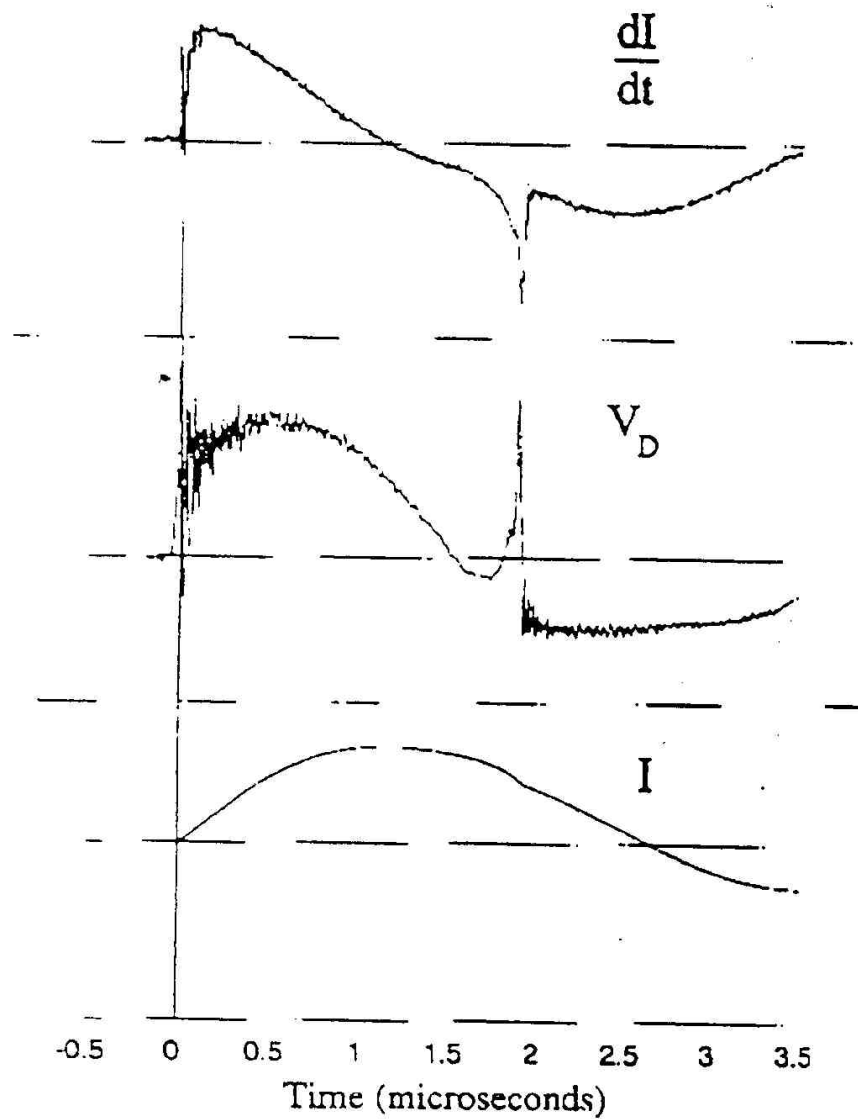
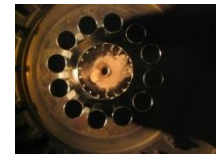
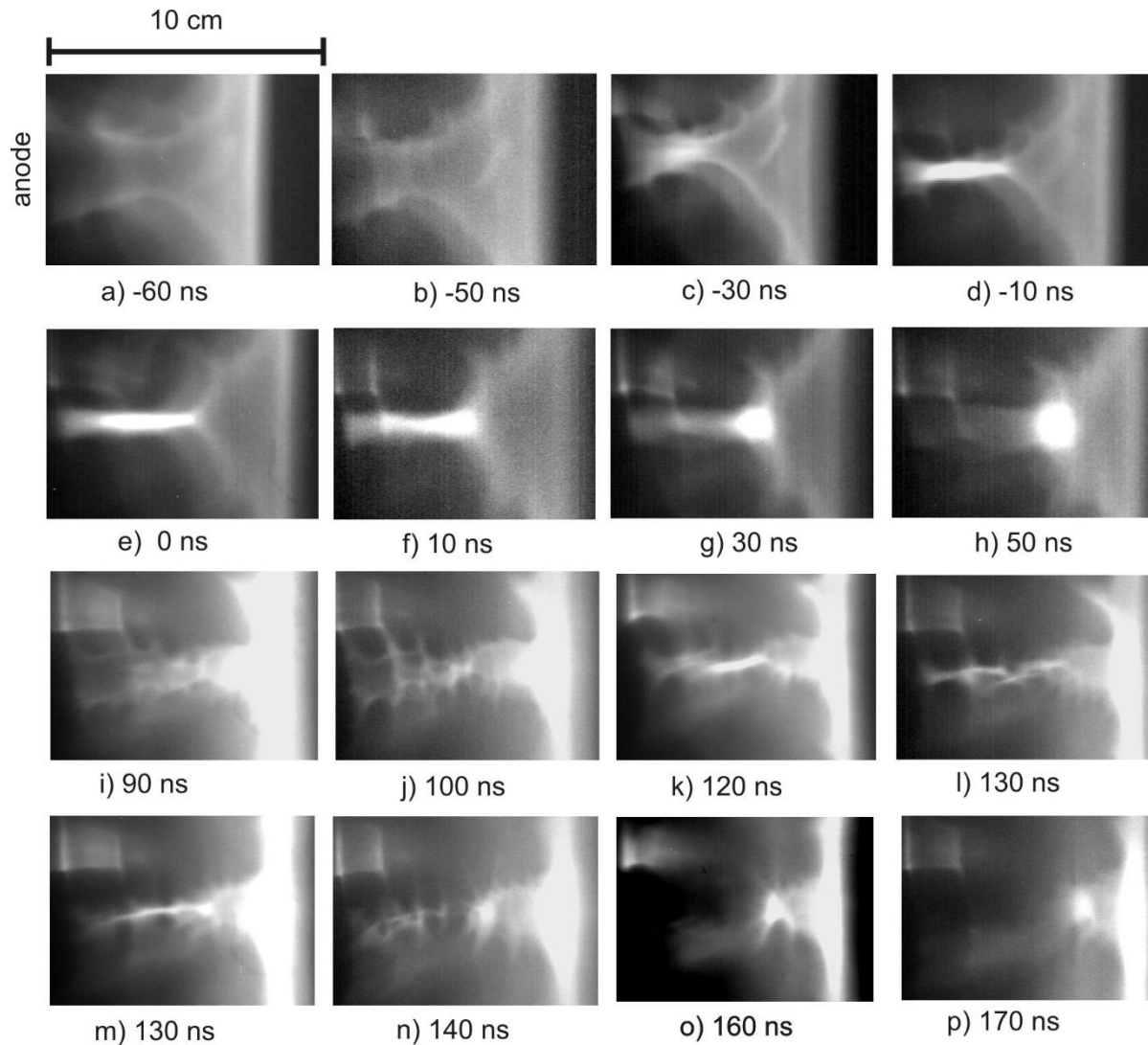


Figure 2.2. Typical waveforms of the current time derivative (upper), voltage (middle) and current (lower) of a plasma Focus discharge.

10-15% за время 10^{-8} с т.е. $dI/dt \sim 10^{14}$ A/c т.е. $E \sim 10^7$ В/м

Visible frames - exposure time 1 ns, window 589 nm



a-d *implosion $2 \times 10^5 \text{ m/s}$*

e *minimum radius $t=0$*

c-g *intense light - dense plasma, dense spherical structure*

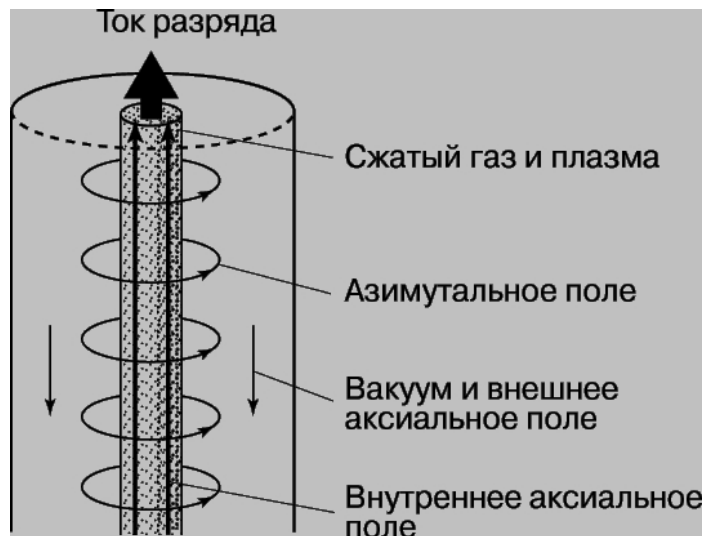
g-p *instabilities*

j-m *second pinch*

m-n *second explosion*

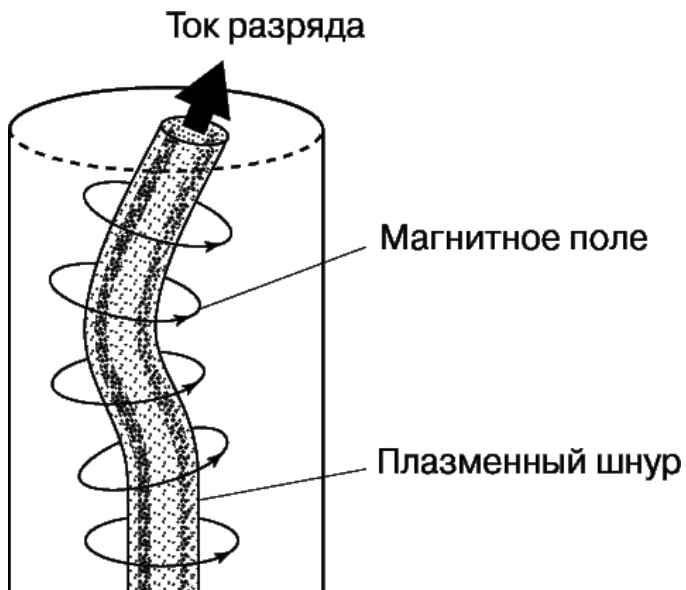
m-p *second dense structure*

Цилиндрический шнур, равновесие (Беннет), МГД (Рэлей-Тейлор), обрыв тока и разрыв ТПО, рост сопротивления, Пл. Диод, взрывообразное высвобождение энергии-ускорение эл-нов и ионов до МэВ

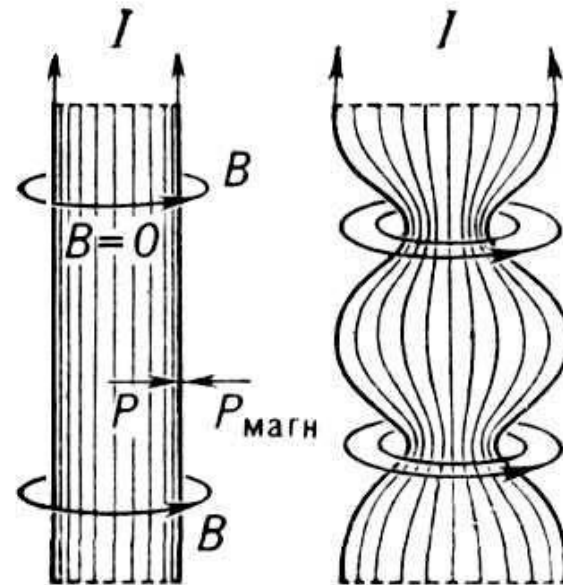


Field reversed pinch,
Gas embedded pinch,
capillary discharge
etc.

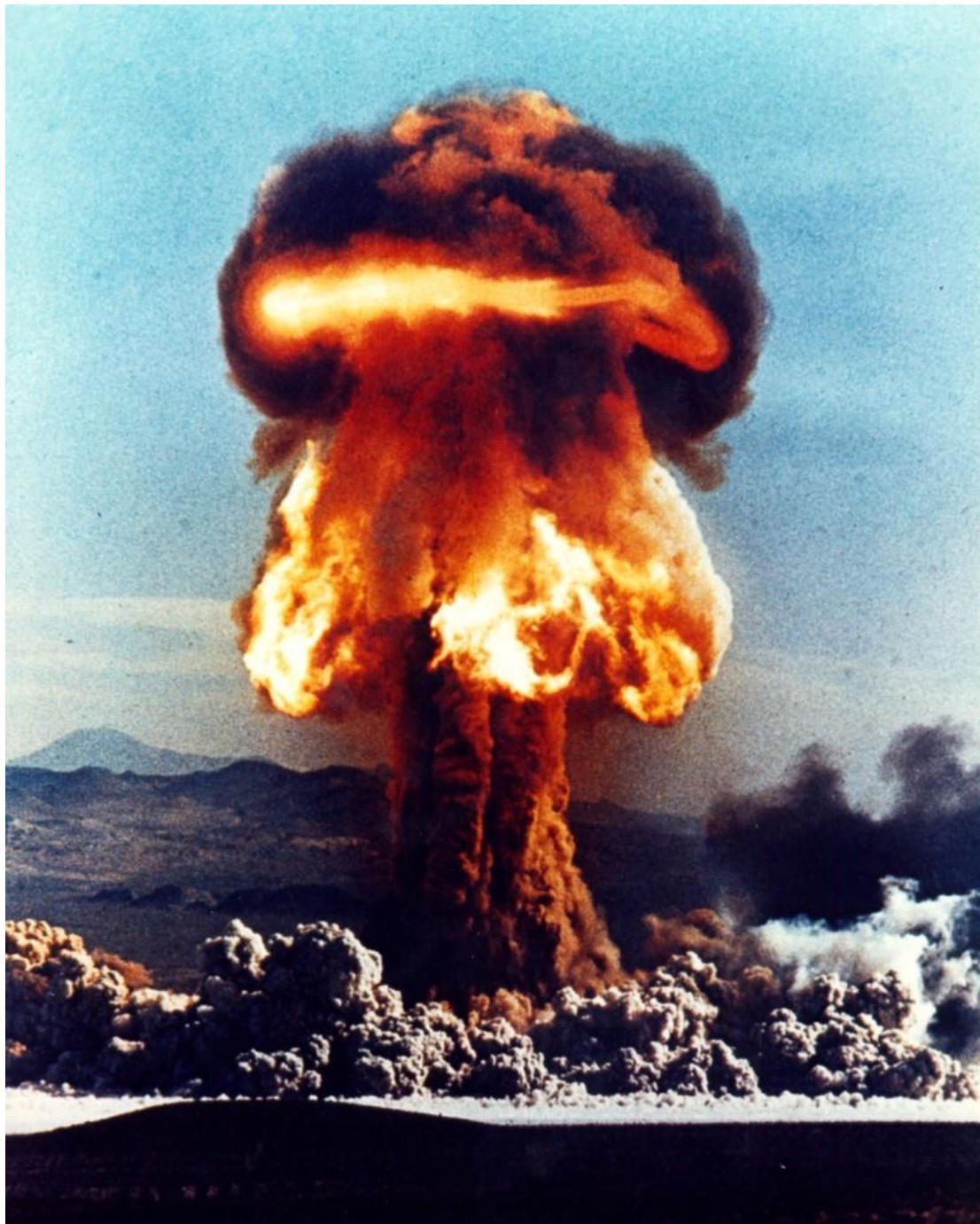
Teta pinch

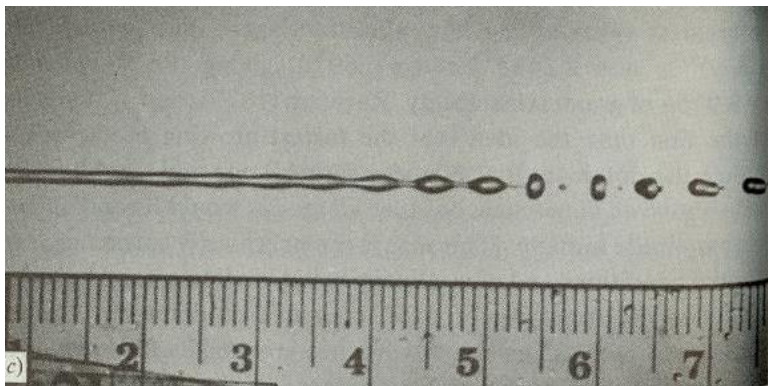
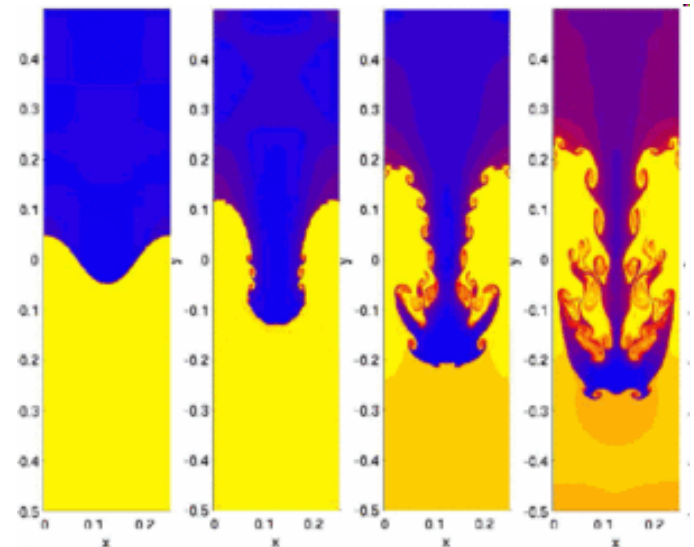
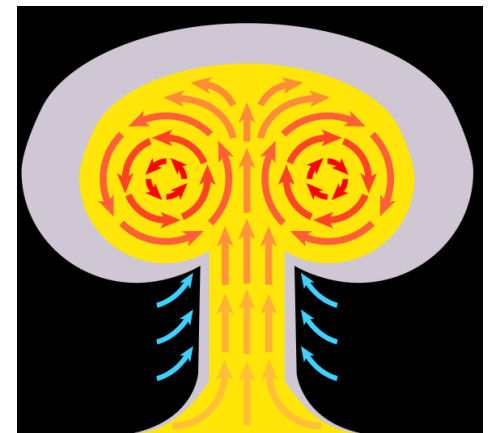


Неустойчивость изгиба



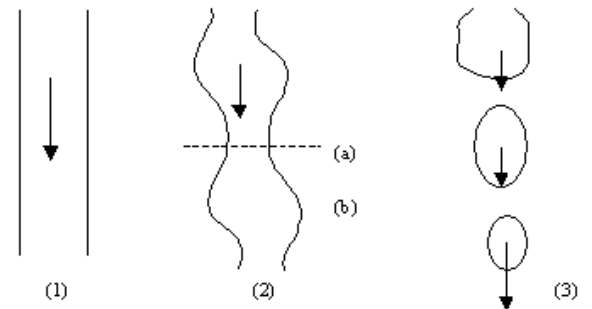
Неустойчивость перетяжки



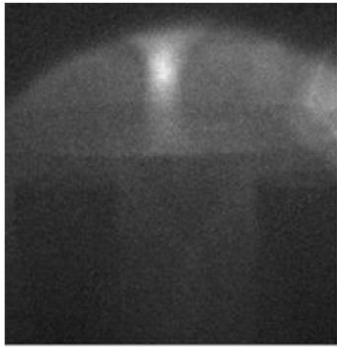


Heavy fluid
 $\rho_2 > \rho_1$

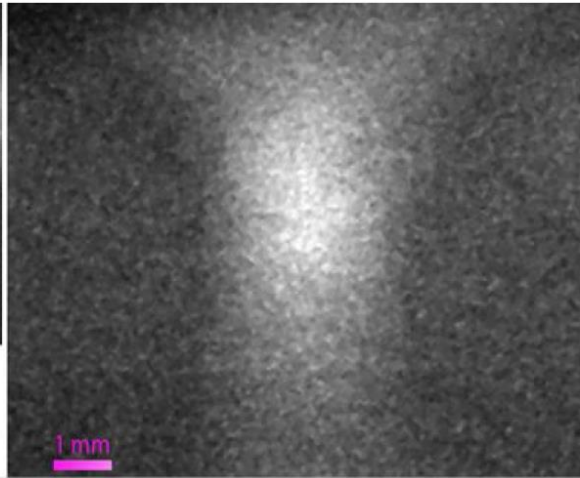
Light fluid
 ρ_1



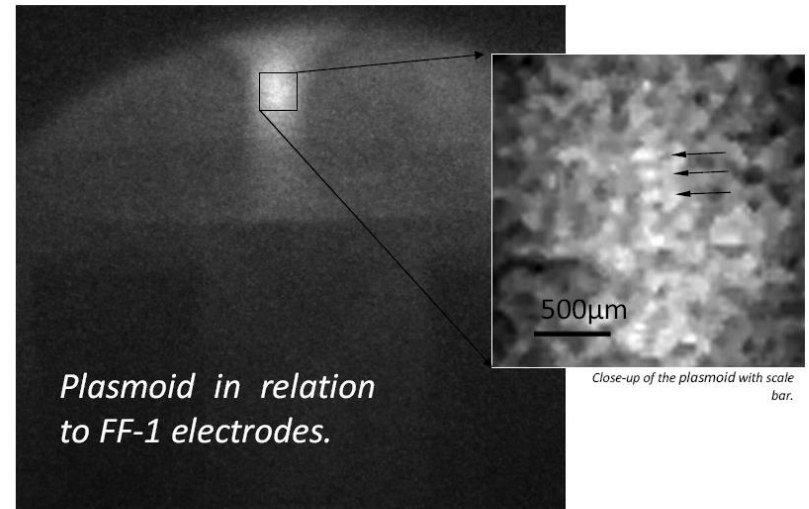
Imaging the plasmoid, shot 01241103



Above, plasmoid in relation to FoFu-1 electrodes. At right, close-up on plasmoid with scale bar.

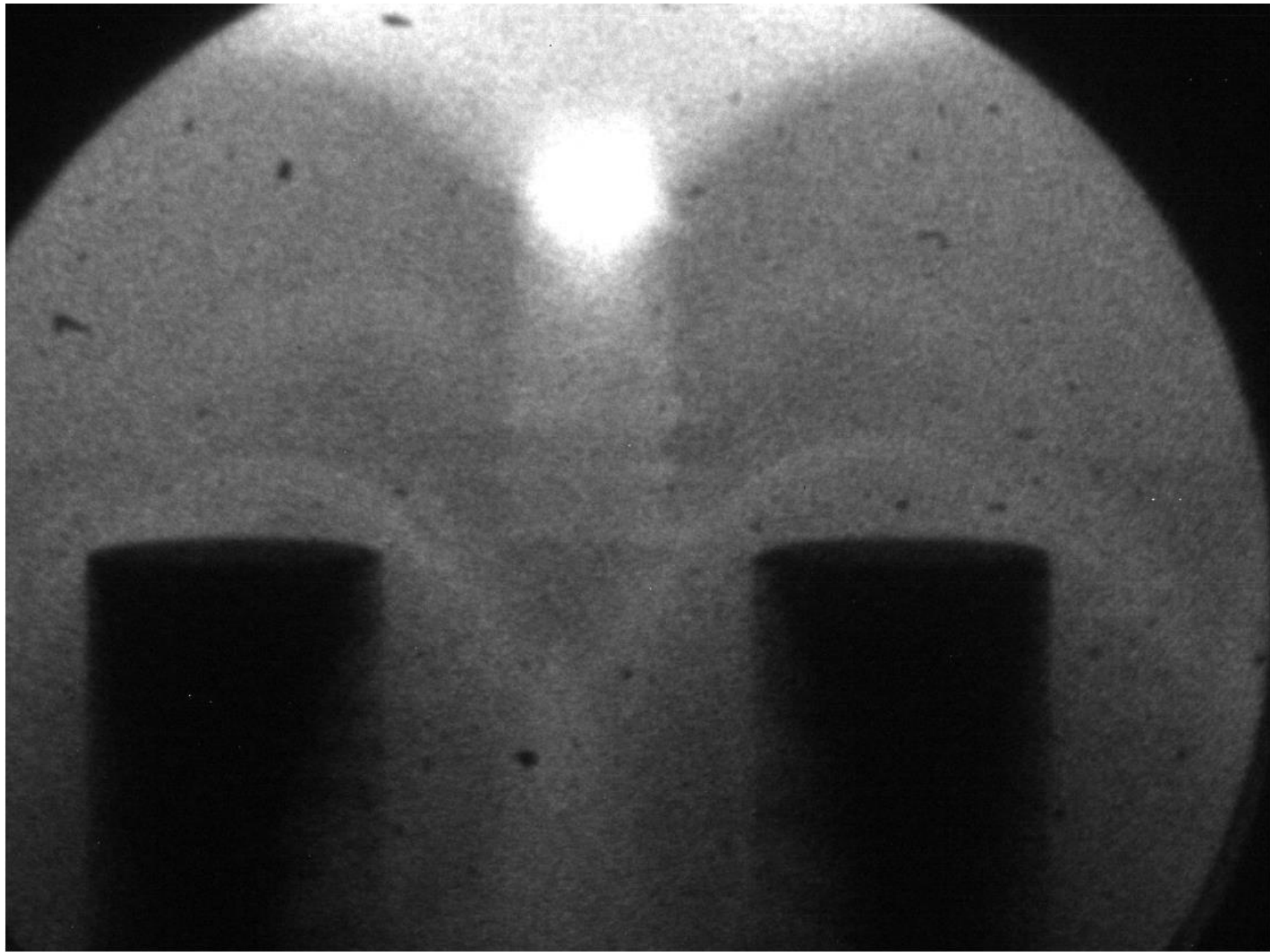


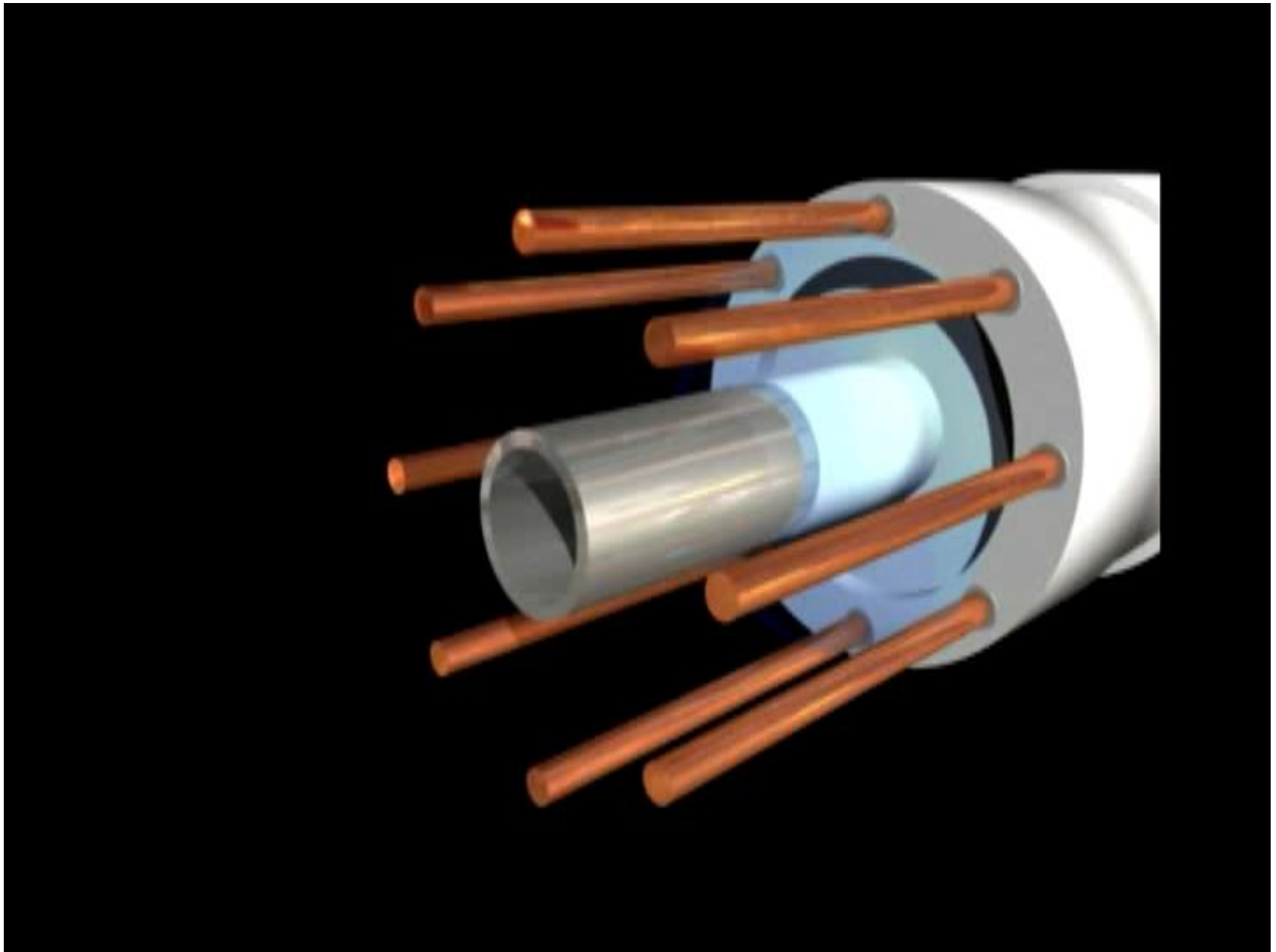
Record 30 μm resolution



Plasmoid in relation to FF-1 electrodes.

Close-up of the plasmoid with scale bar.





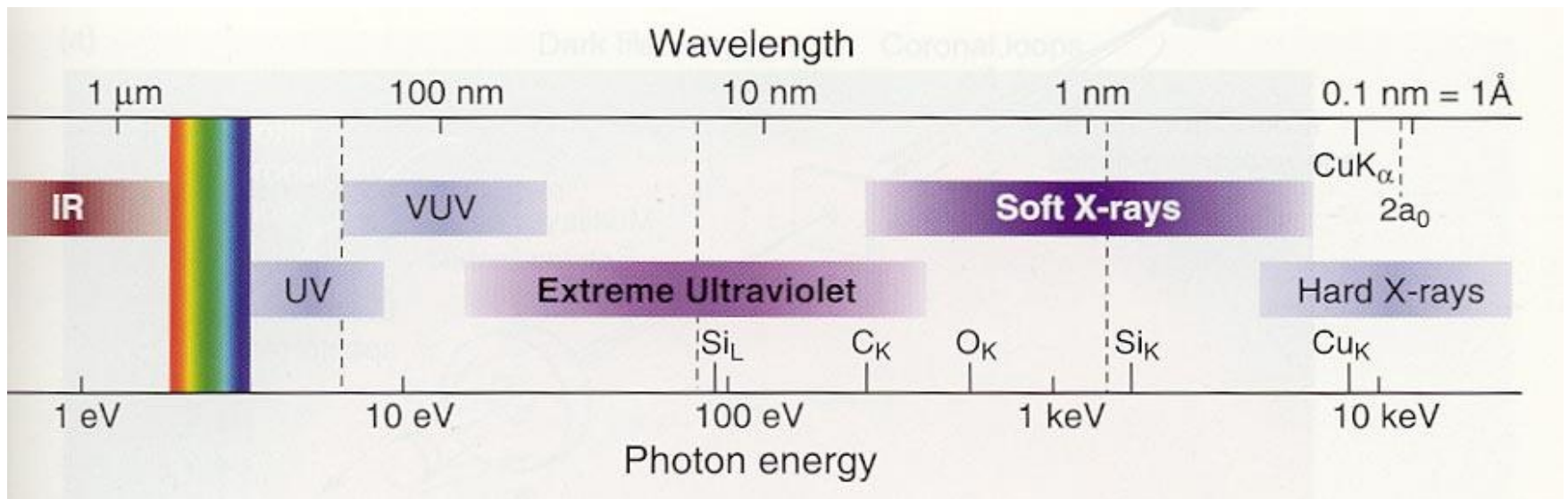


Figure 5.4. Time correlation ($\pm 3\text{ns}$) of diagnostic signals obtained in a plasma Focus experiment¹⁰⁴ from top to bottom with detector specified:

opposite of discharge current time derivative (magnetic loop)

infrared plasma emission at $\lambda = 5\ \mu\text{m}$ (cryogenic Cu:Ge detector)

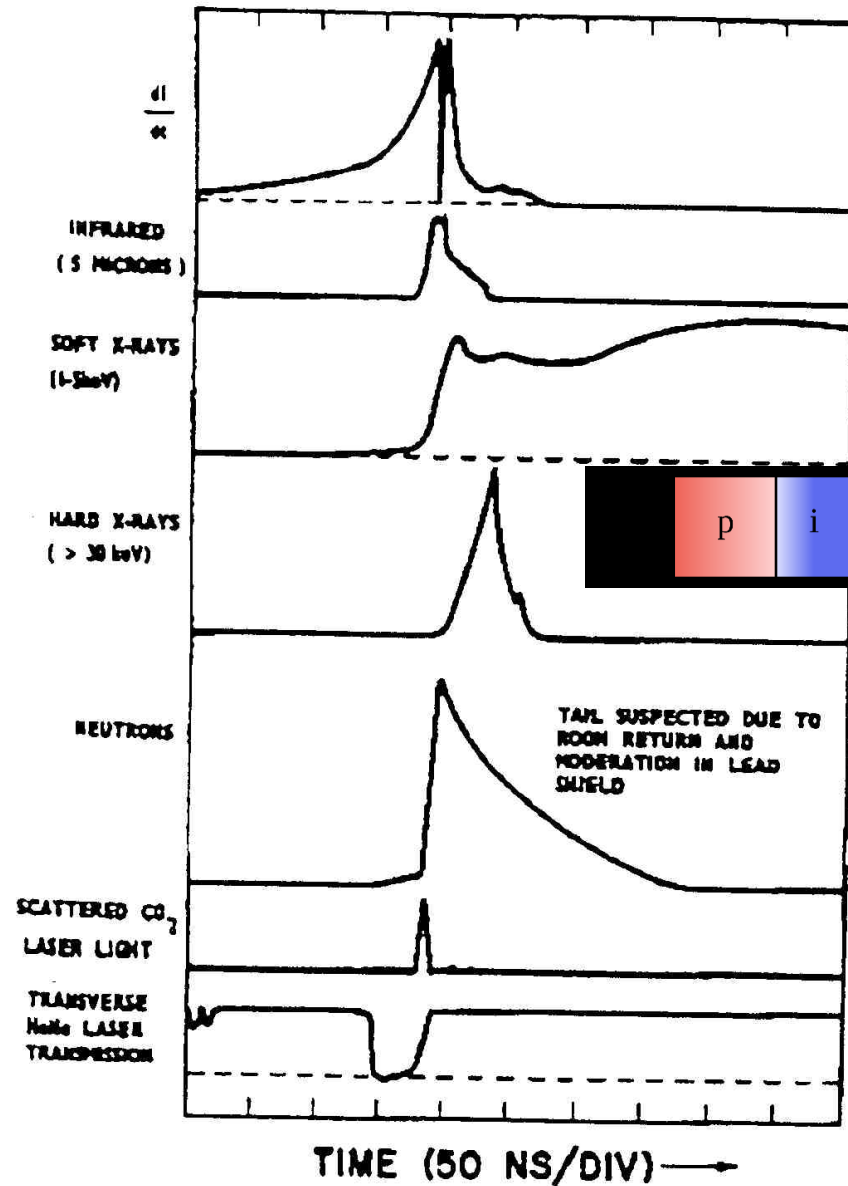
soft X-ray emission in the 1-5 keV energy band (PIN diode)

hard X-ray emission with photon energy above 30 keV (PIN diode)

neutron emission (NE102 scintillator and photomultiplier)

scattered CO_2 (10.6 μm) laser light (cryogenic Cu:Ge detector)

He-Ne laser beam deflection signal (PIN diode)



Мягкий Рентген: пинч-плазменная мишень с которой взаимодей. потоки частиц
Жесткий Рентген: взаимодей. ускоренных электронов с анодом.

Когда происходит обрыв тока, то скорость электронов достигает $\sim 10^9$ см/с, вместо электрич. тока через пинч идёт ускоренный поток электронов, к-рый самофокусируется внутри плазмы пинча. В фокальной зоне вблизи анода он испытывает аномальное поглощение, порождая мощную ударную волну, к-рая, проходя через пинч, нагревает его до темп-ры $\sim (2 - 3) \times 10^7$ К (2 - 3 кэВ) и даёт мощную вспышку нейтронного излучения.

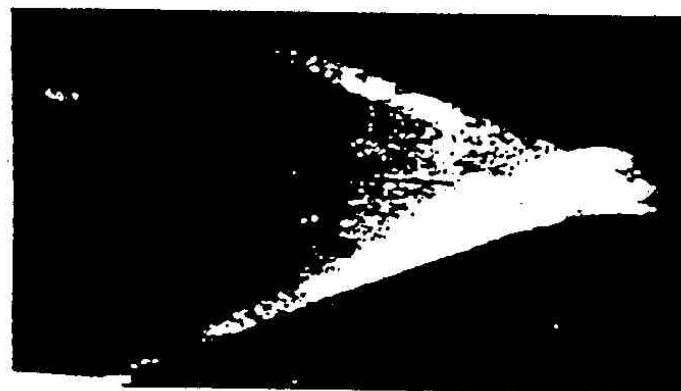
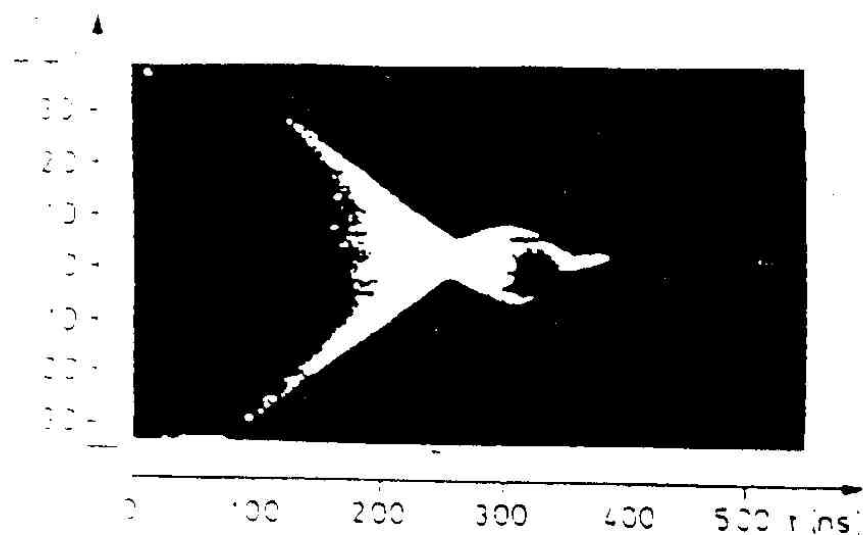


Figure 5.2. Streak pictures taken for a "good" and a "poor" discharge (500 kJ, 80 kV, 600 Pa D_2 , insulator material Al_2O_3).⁹⁴

- fast e-beam:	$E = 0.02 \dots 1.0 \text{ MeV}$ $P = 10^7 \text{ MW/m}^2$ $k = 10\%$
- fast ion beam (<i>D or T</i>):	$E = 0.02 \dots 10.0 \text{ MeV}$ $P = 10^4 \text{ MW/m}^2$ $k = 10\%$
- soft X-Rays (1...10 keV)	$P = 10^3 \text{ MW/m}^2$ $k = 10\%$
- hard X-rays (0.02...1.0 MeV)	$P = 10^4 \text{ MW/m}^2$ $k = 1\%$
- neutrons (2.5, 14.0 MeV)	$10^{12} \dots 10^{14} \text{ neutr/pulse}$ $k = 0.1\%$

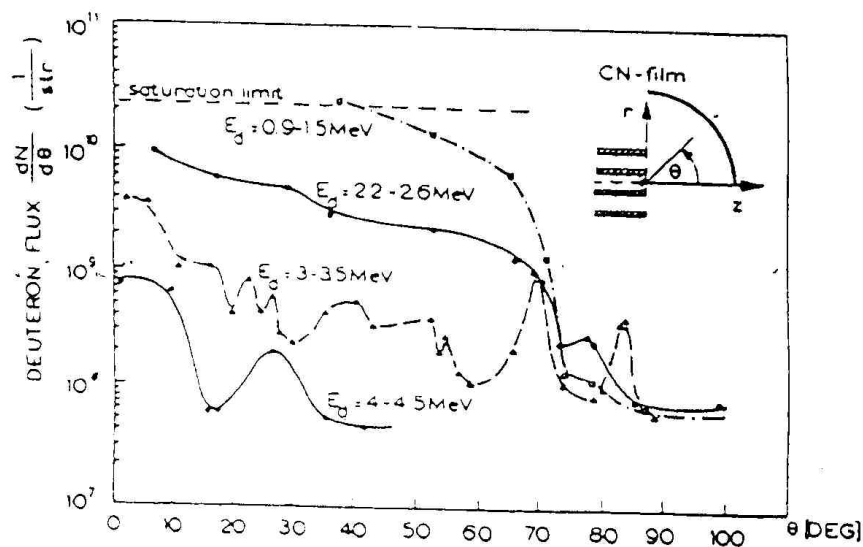


Figure 9.1. Angular distribution of deuterons emitted from a single 28 kJ plasma Focus discharge¹⁸⁶ performed at $p_0 = 6.7$ mbar D_2 . $Y_n = 5.5 \times 10^9$.

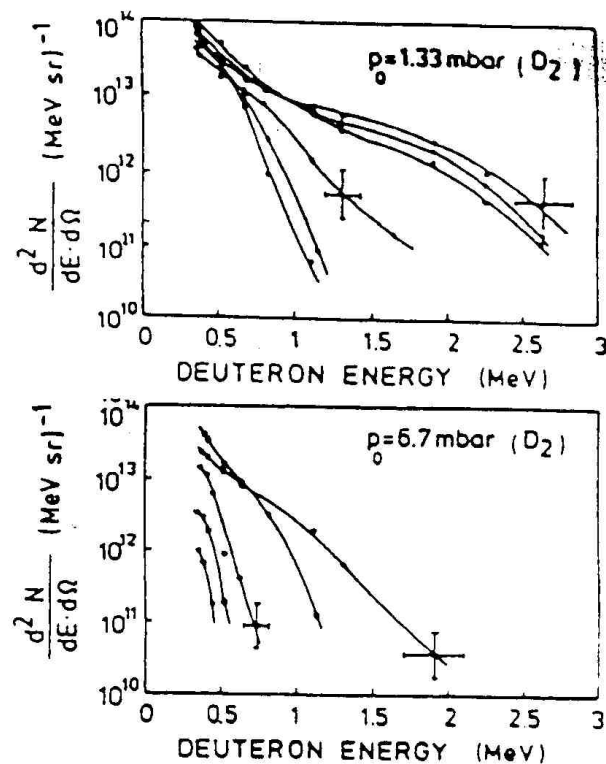
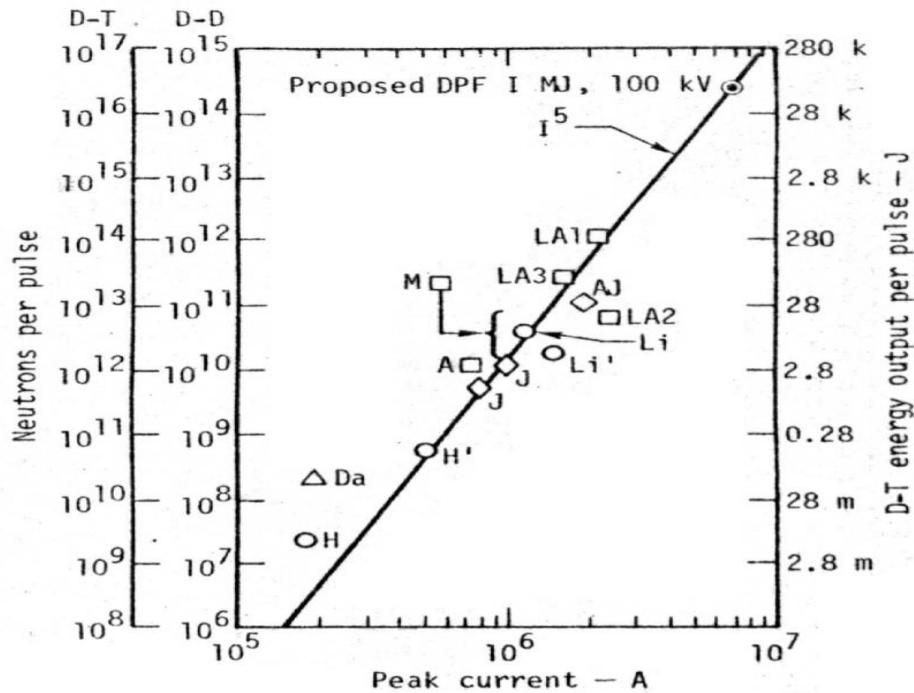


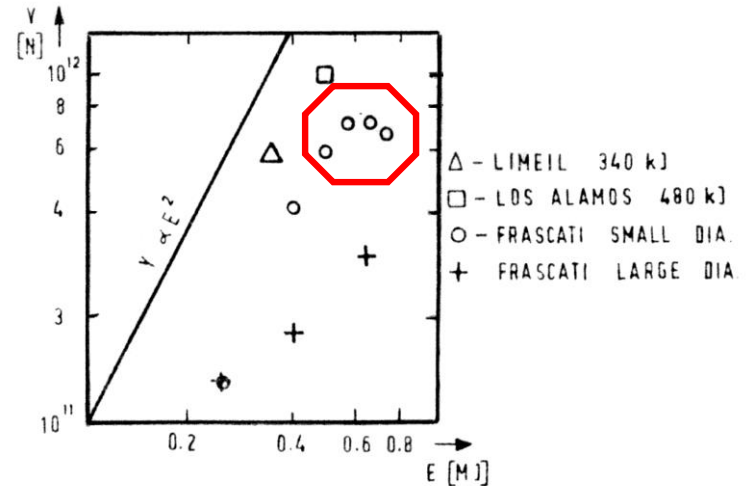
Figure 9.3 Energy distribution functions of fast deuterons obtained from different plasma Focus shots performed with the 56 kJ facility.¹⁸⁴

Scaling



Legend

- AJ Aerojet Nucleonics. 250 kJ, 20 kV, 320 μ F.
- Da Darmstadt. 0.34 - 1.35 kJ; 10 - 20 kV.
- H Hoboken. Electrode structure is identical to that of Darmstadt group.
- H' Hoboken. About 5 kJ.
- A^E Aerospace Corporation.
- J Julich. 25 kJ; 40 kV.
- Li Limeil. 96 kJ, 40 kV.
- Li' Limeil. Plasma focus driven by explosive generator.
- LA¹ Los Alamos. DPF-6; 420 kJ.
- LA² Los Alamos. DPF-5; 120 kJ.
- LA³ Los Alamos. DPF-6; 210 kJ.
- M Moscow. $Y \rightarrow 10^{10}$ to 10^{11} DD neutrons; $I = 1$ MA.



$$Y_n \propto I^4 \quad I^2 \propto E$$

$$Y_n \propto E^2$$

Зміна енергії живлення П. ф. в діапазоні 10^{-3} - 1 МДж змінює його вихідні параметри:

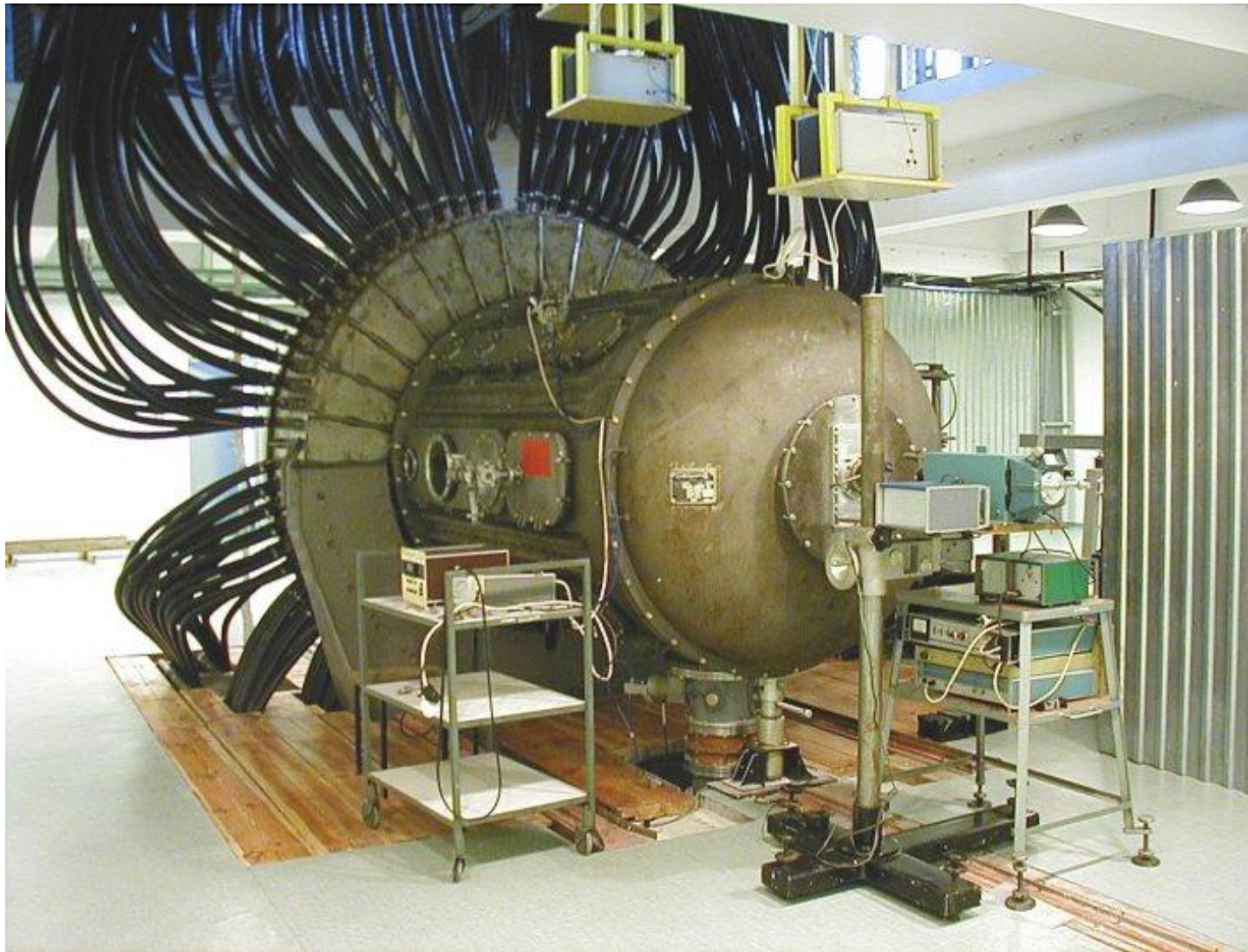
Вихід нейтронів зростає із збільшенням енергії як квадрат енергозапасу або четвертий ступінь струму.

У цьому спектр нейтронного випромінювання не змінюється;

електронна темп-ра та щільність плазми практично не залежать від енергозапасу;

проте зі збільшенням розрядного струму приблизно лінійно зростає енергозміст пучків заряд. частинок та час утримання плазми та замагнічених іонів, тоді як обсяг плазми збільшується квадратично зі зростанням струму.

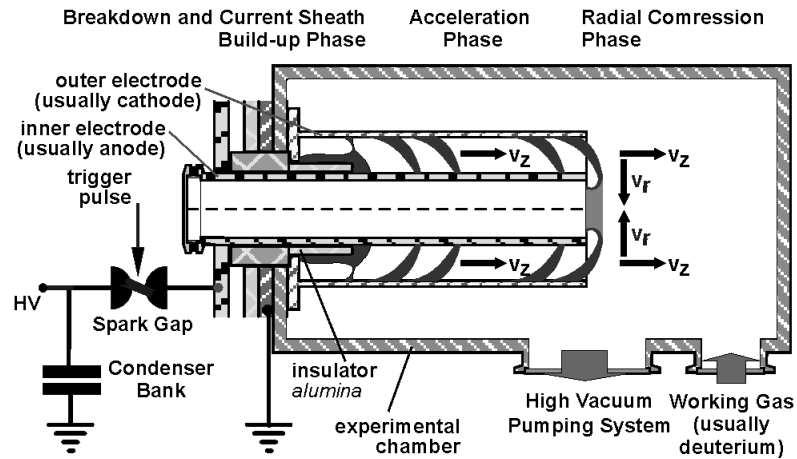
APPARATUS



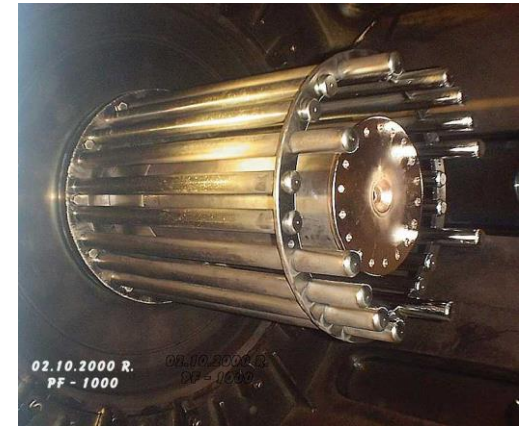
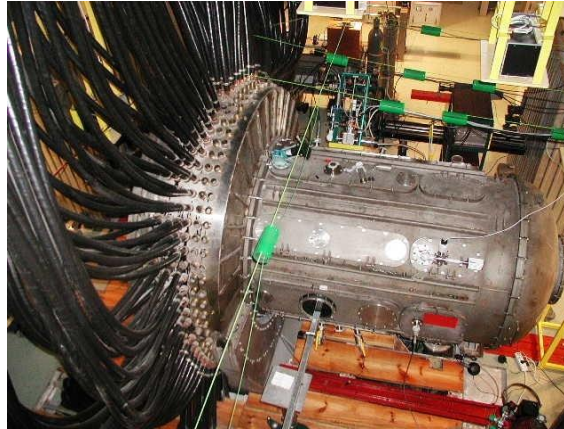
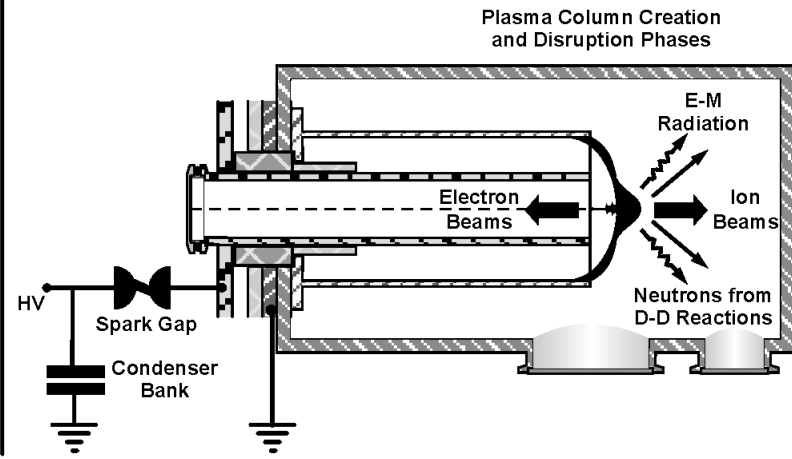
PF-1000 facility: 1.2 MJ, 2.5 MA, 2.10^{11}_{DD} n/pulse (IPPLM, Poland)

Apparatus

Early and Intermediate Stages of PF Phenomenon



Final Stages of PF Phenomenon

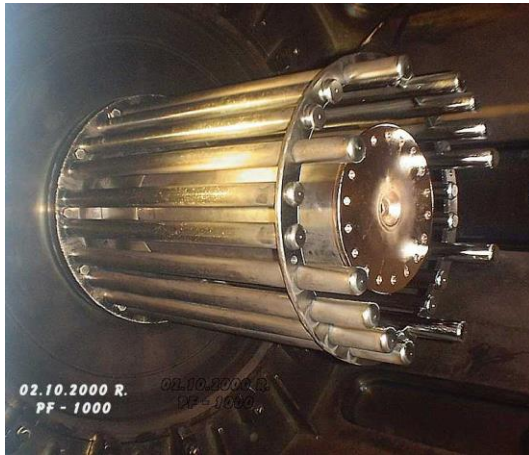


Generator PF-1000



the charging voltage - $U_0 = 20 - 40 \text{ kV}$,
the bank capacitance - $C_0 = 1.332 \text{ mF}$,
the bank energy - $E_0 = 266 - 1064 \text{ kJ}$,
the nominal inductance - $L_0 = 15 \text{ nH}$,
the quarter discharge time - $T_{1/4} = 6 \text{ } \mu\text{s}$,
the short-circuit current - $I_{SC} = 12 \text{ MA}$,
the characteristic resistance - $R_0 = 2.6 \text{ m}\Omega$,

Electrodes



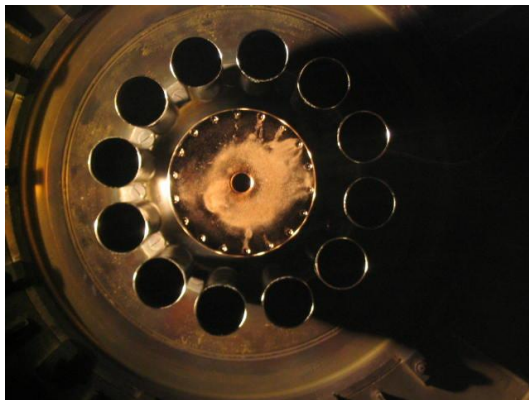
CE diameter - 226 mm

OE diameter - 400 mm

OE consists 24 rods (diam. 32 mm)

length of electrode - 560 mm

length of insulator - 113 mm



CE diameter - 226 mm

OE diameter - 400 mm

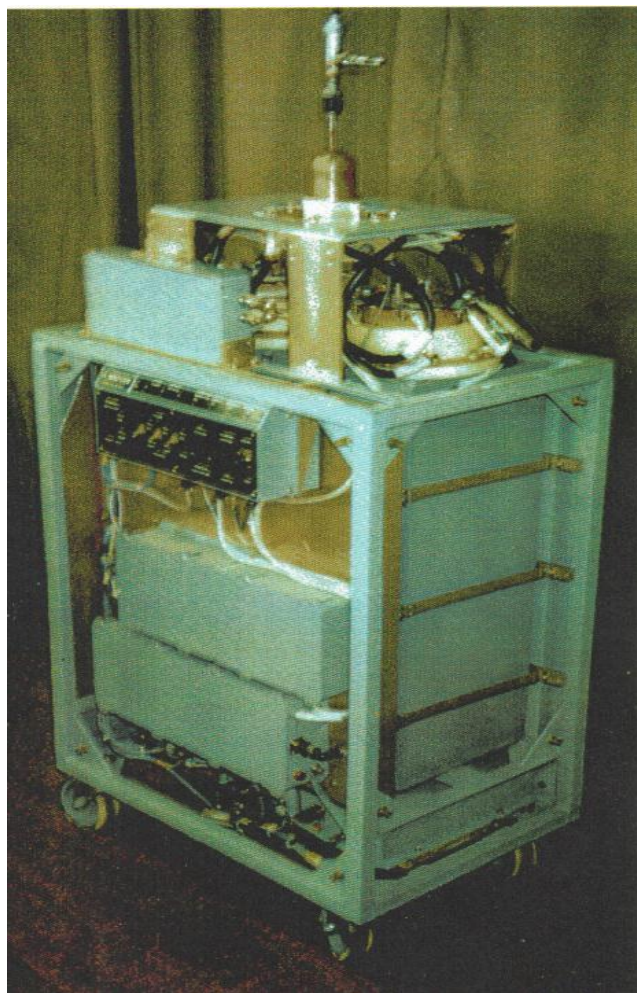
OE consists 12 rods (diam. 80 mm)

length of electrode - 560 mm

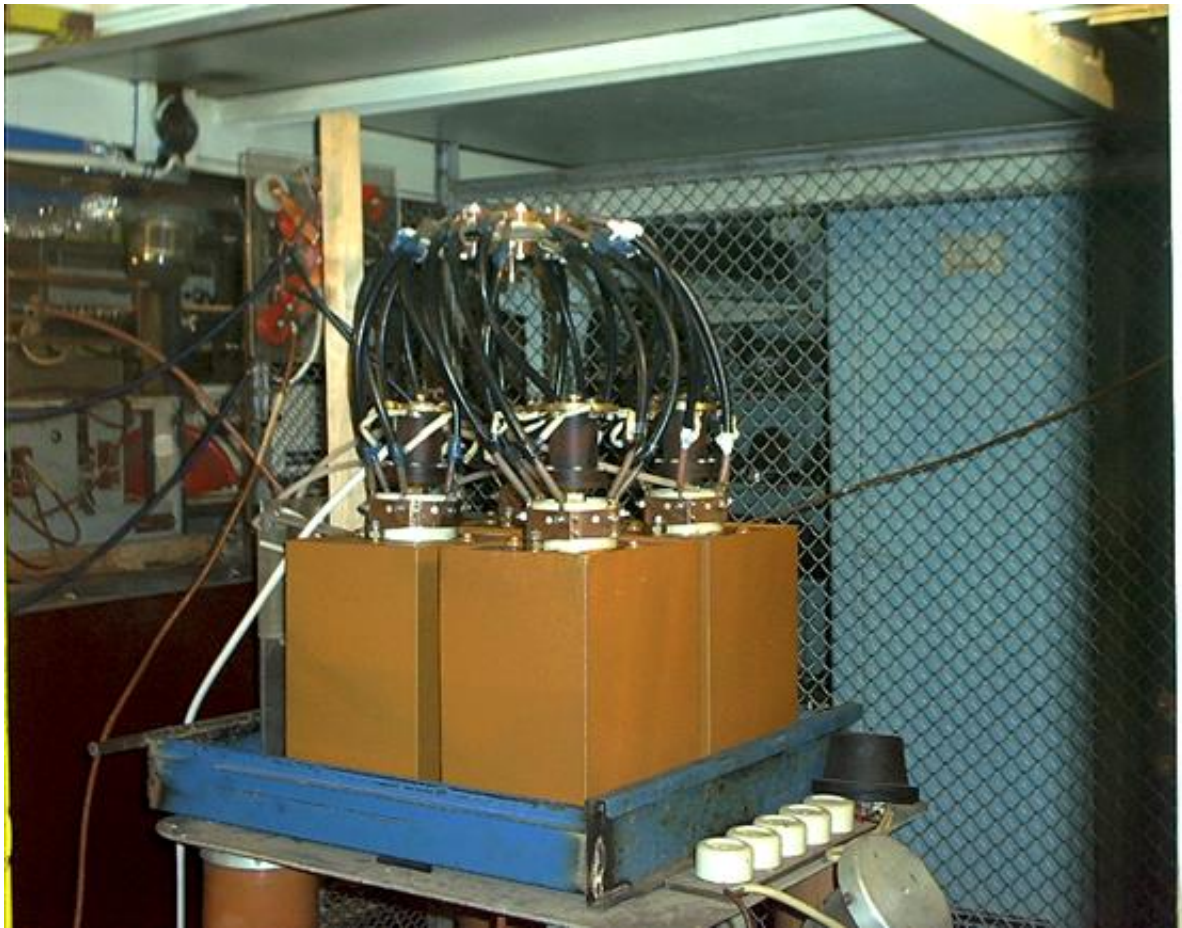
length of insulator - 113 mm



**Transportable device: PF-6, 7 кДж, 750 кА,
 10^9_{DD} n/pulse, weight - 400 кг)**



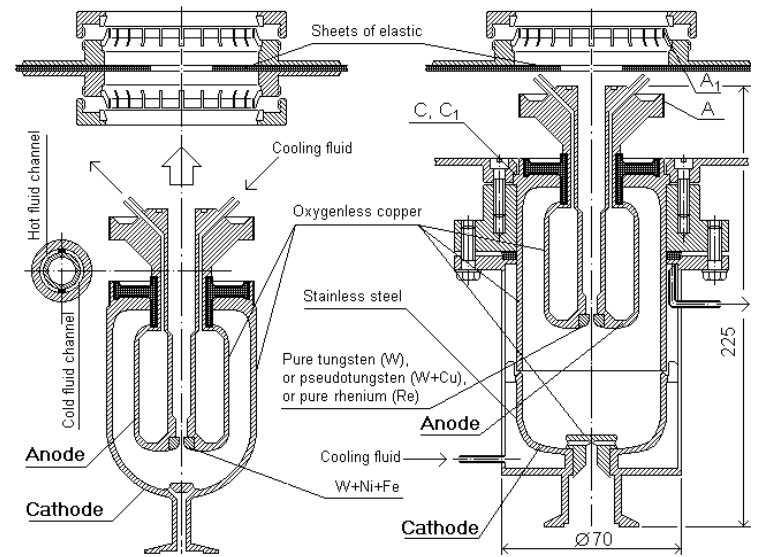
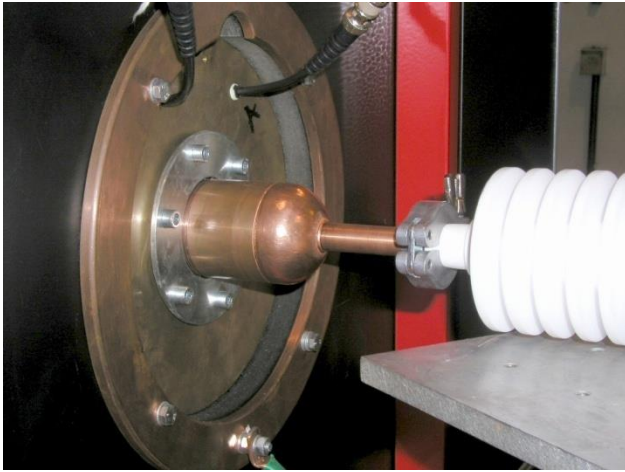
**Transportable device: ING-103, 4 кДж, 400 кА,
 $2 \cdot 10^{10}_{DT}$ n/pulse, weight - 150 кг (VNIIA,
Moscow, Russia)**



Transportable device: PF-10, 10 кДж, 450 кА,
 2.10^8 n/pulse, weight - 150 кг (ITEP, Russia)



**Portable device: ING-102, 100 Дж, 150 kA,
 10_{DT}^8 n/pulse, weight - 15 кг (VNIIA, Russia)**



DPF chambers of transportable devices

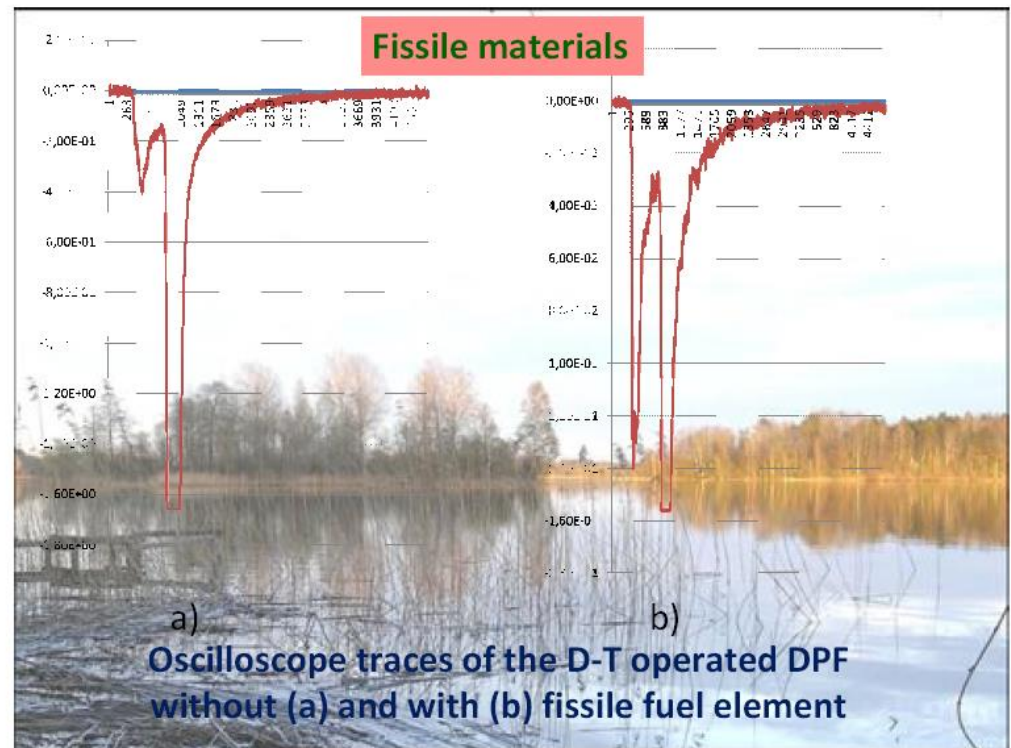
Технологічні застосування ПФ

- джерела нейтронів та жорстких випромінювань для вирішення низки науково-техн. задач: матеріалознавчих та бланкетних випробувань для керованого термоядерного синтезу; імпульсного активації. аналізу короткоживучих ізотопів; нейтронної терапії;
- накачування лазерних середовищ; вивчення високоіонізов. іонів; взаємодії потужних пучків із плазмою
- ВУФ літографія
- імпульсна іонна імплантація (MeV)
- Динамічна дефектоскопія (у русі: дефекти в покришках, вузлах)
- Медицина (діагностика, ПЕТ тощо, руйнівна терапія)
- Перспективи застосування ПФ виявлення прихованих предметів (ВВ, наркотики тощо.). Наносекундна імпульсна система для опромінення запечатаних контейнерів.

Nuclear medicine

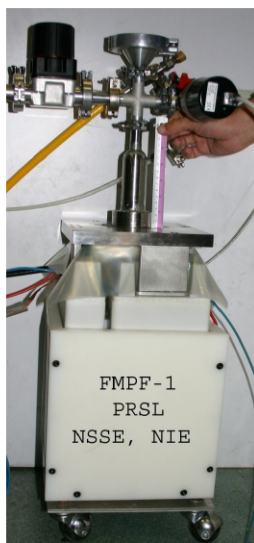
During last 2 years we were looking for an opportunity to use nanosecond powerful neutron pulses of DPF for a possible *low-dose neutron capture therapy* of malignant tumors

In our studies we tried to understand whether it would be possible to use DPF in neutron-capture therapy at all and probably to have with neutrons the same effects as we reached in our previous works at the irradiation of enzymes by the medium-energy (~ 8 keV) X-Ray photons



Parameters of 'FMPF-1' device

0.2m × 0.2m × 0.5m

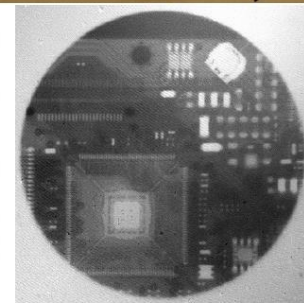
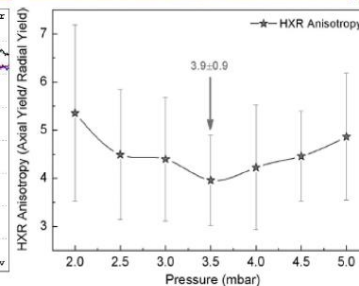
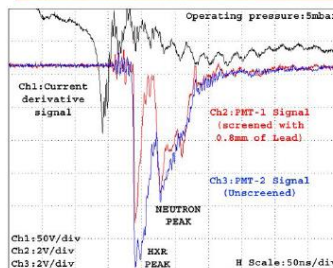
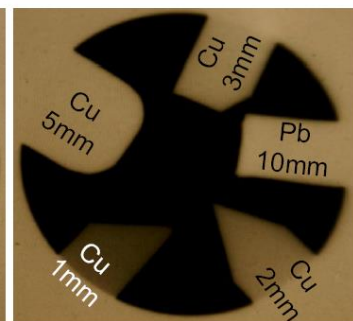
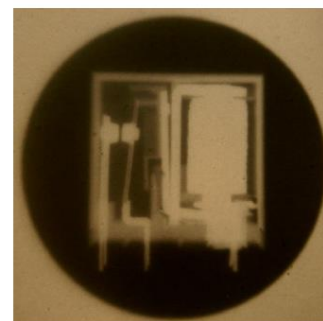
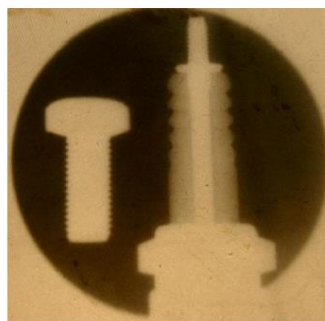


(Total Weight: ~25kgs)

Main electrical characteristics of FMPF-1 device.	
Energy bank capacitance (C_p)	2.4 μ F
Maximum charging voltage (V_p)	14kV
Maximum stored energy @14kV (E_p)	235J
Maximum current (under short circuit) (I_{sc})	87kA @14kV
Typical operating voltage range	12 – 14 kV
Eq. circuit inductance (L_{eq})	27 $\pm$ 2nH
Eq. circuit resistance (R_{eq})	66 $\pm$ 3m Ω
Voltage Reversal (k)	33%
Quarter time of discharge ($T/4$)	~400ns
Maximum discharge repetition rate (DRR)	0.5Hz

Fully Integrated System

Applications: HXR radiography source



Rishi Verma, R. S. Rawat, P. Lee, M. Krishnan, S.V. Springham, and T.L. Tan, *Miniature plasma focus device as a compact hard X-Ray source for fast radiography applications*, IEEE Transactions on Plasma Science **38**(4), 652-657 (2010).

Applications: Nanophase Soft Magnetic FeCo Thin Films

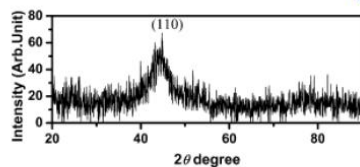


Fig. 5. XRD pattern of the sample deposited on the Si(100) substrate using hydrogen as filling gas.

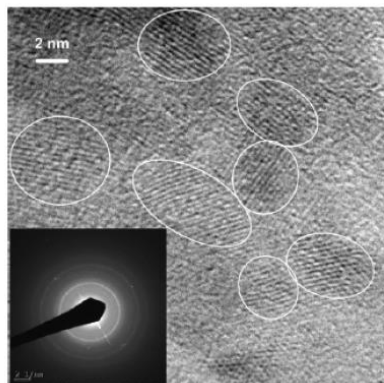


Fig. 6. HRTEM image of the sample deposited on the Si(100) substrate using hydrogen as filling gas and corresponding SAD pattern in the inset.

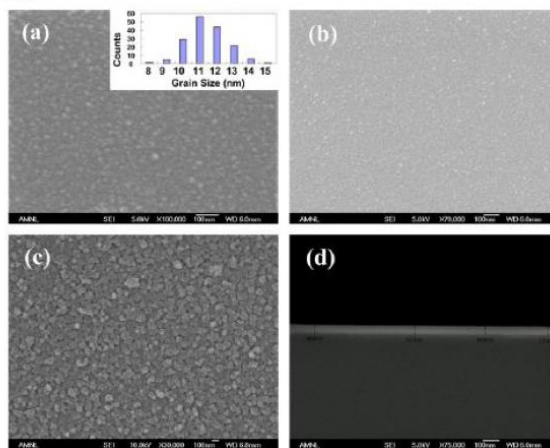


Fig. 3. The morphological images of the FeCo samples deposited on (a) Si(100), (b) MgO(100), (c) amorphous Al₂O₃ substrates, and (d) the cross sectional view of the sample deposited on Si(100) using hydrogen as filling gas.

Z.Y. Pan, R.S. Rawat, R. Verma, J.J. Lin, H. Van D V, Domanyan, D. Lee, S.V. Springham, T.L. Tan, *Miniature plasma synthesis of soft magnetic FeCo thin films*, P. (2010).

Applications: High Deposition rate DLC Film Synthesis using FMPF-2

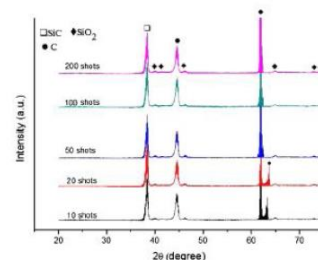


Fig. 5. XRD patterns obtained for DLC films deposited at a distance of 6 cm using different number of focus deposition shots.

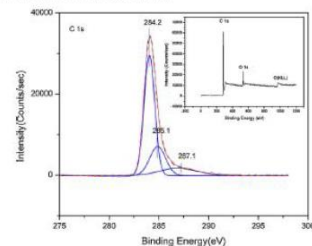


Fig. 7. De-convolution of the C 1s binding energy peak of XPS spectrum of the deposited with 100 shots. The inset shows the typical XPS survey spectrum of the same sample.

E. Gharshebani, R. S. Rawat, R. Verma, S. Karamat, and S. Sobhanian, *Low energy repetitive miniature plasma focus device as high deposition rate facility for synthesis of DLC thin films*, Applied Surface Science 256(16), 4977-83 (2010).

Atomic percentage			
No. of shots	C	O	Si
10	95.89	3.44	0.67
20	89.96	8.85	1.19
50	93.94	5.96	0.10
100	93.12	6.81	0.07
200	93.55	6.38	0.07

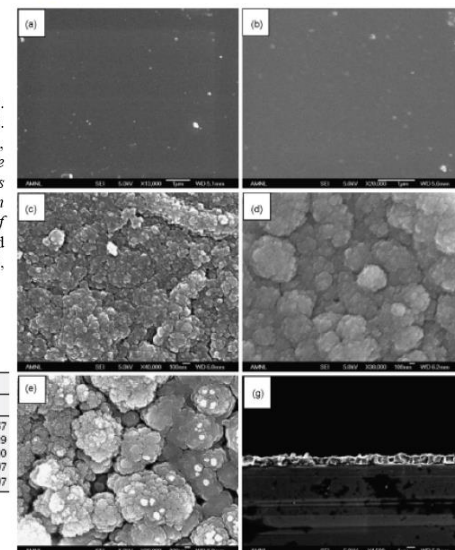


Fig. 6. (a) 10, (b) 20, (c) 50, (d) 100 and (e) 200 focus deposition (g) cross-sectional SEM for 200 focus deposition shots.